

Strömungsmessung des Kühlschmierstoffs in der Kontaktzone

Flow measurement of the cooling lubricant at the lubrication gap

**Björn Espenhahn¹, Lukas Schumski², Dirk Stöbener^{1,3}, Daniel Meyer^{2,3},
Andreas Fischer^{1,3}**

¹ Universität Bremen, Bremer Institut für Messtechnik, Automatisierung und Qualitätswissenschaft (BIMAQ), Linzer Straße 13, 28359 Bremen, E-Mail: B.Espenhahn@bimaq.de

² Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien – IWT, Badgasteiner Straße 3, 28359 Bremen

³ Universität Bremen, MAPEX Center for Materials and Processes, Postbox 330440, 28359 Bremen

Schleifen, Zweiphasenströmung, PIV, in situ grinding, two-phase flow, PIV, in situ

Zusammenfassung

Um die Wirkmechanismen der Flüssigkühlung beim Schleifprozesses zu verstehen und die Effizienz des Kühlprozesses zu verbessern, wurde eine nicht-invasive, in-situ-fähige Messmethode zur hochauflösenden Messung der Kühlschmierstoff(KSS)-Strömung in einer Schleifmaschine erarbeitet. Der Messansatz nutzt die Lichtbrechung an den Grenzflächen der Zwei-Phasen-Strömung (KSS und Luft), so dass auch ohne Zugabe von Seedingpartikeln mittels Particle Image Velocimetry gemessen werden kann. Zudem wird ein optisch transparentes Werkstück verwendet, um eine Beleuchtung und Beobachtung der Strömung in der Kontaktzone zu erreichen. Mit den resultierenden Strömungsmessungen wird erstmals eine detaillierte strömungsmechanische Beschreibung der Wechselwirkung des KSS mit der rotierenden Schleifscheibe für den Zufuhr-, Auftreff- und Mitnahmebereich durchgeführt. Im zweiten Schritt erfolgt eine Beschreibung der Wechselwirkung von KSS mit dem Werkzeug und dem Werkstück. Der Einblick die komplexen Mehrfachwechselwirkungen liefert erste Ursachen für eine reduzierte Kühlleistung durch eine KSS-Übersorgung.

Einleitung

Schleifprozesse sind ein häufig eingesetzter Endbearbeitungsprozess für die Fertigung von metallischen Bauteilen höchster Oberflächengüte. Um die Wärmeentwicklung des Schleifprozesses zu regulieren, ist eine Zufuhr von flüssigem Kühlschmierstoff (KSS) über Düsenströmungen essentiell, wobei der resultierende Wärmeeintrag in das Bauteil stark von den Zu- und Abfuhrbedingungen des KSS abhängig ist und bis jetzt nur indirekt ermittelt werden kann (Brinksmeier et al., 2015). Die Zufuhrbedingungen vom Kühlmittel müssen so eingestellt werden, dass eine positive Wechselwirkung mit Schleifscheibe und Werkstück in dem Sinne vorliegt, dass eine hohe Menge an Flüssigkeit in die Kontaktzone transportiert wird (Morgan et al., 2008). Unter optimalen Bedingungen ist die Kontaktzone vollständig mit Flüssigkeit gefüllt. Was das Strömungsfeld des Fluids in der Kontaktzone betrifft, so entspricht die Strömungsgeschwindigkeit gemäß den Fluid-Wand-Randbedingungen der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit und der Werkstückgeschwindigkeit und dazwischen hängen die Strömungsgeschwindigkeiten stark von den Wechselwirkungen von Strahl und Werkzeug ab (Guo und Malkin, 1994).

In aktuellen industriellen Anwendungen wird eine ausreichende Kühlung durch eine Übersorgung von KSS gewährleistet (Heinzel et al., 2015), was einen hohen Verbrauch von KSS und damit verbunden wirtschaftliche Kosten und eine Umweltbelastung mit sich bringt. Es ist deshalb erstrebenswert, den Kühlprozess hinsichtlich der Kühlmittelmenge und -leistung zu optimieren (Heinzel und Kolkwitz, 2019; Rouly et al., 2017).

Um dies zu erreichen, ist ein grundlegendes Verständnis der fluid- und thermodynamischen Wechselwirkungen zwischen KSS, Werkzeug (Schleifscheibe) und Werkstück notwendig, das aufgrund von fehlenden Strömungsmessungen vom Schleifprozess unvollständig ist (Heinzel et al., 2020).

Erste Strömungsmessungen mit den komplementären Ansätzen der Schattenwurftechnik (shadowgraphy) und der Particle Image Velocimetry (PIV) zur Visualisierung der KSS-Strömung ohne Werkstück wurden kürzlich durchgeführt und liefern qualitative (Schumski et al., 2022) und quantitative (Espenhahn et al., 2021; Vanselow et al., 2021) Einblicke in die Wechselwirkung zwischen KSS-Strömung und Werkzeug. Die Untersuchungen der hochdynamischen Zwei-Phasen-Strömung zeigte, dass eine Strömungsvisualisierung über die Beobachtung von den von außen sichtbaren Phasengrenzflächen erfolgt. Damit ist eine Strömungsmessung ohne künstlich zugefügte Tracer-Partikel möglich. Dies ist insofern hervorhebenswert, weil durch den Einfluss der Lichtbrechung der Zweiphasenströmung die Beobachtung von Partikeln innerhalb der Strömung in Abhängigkeit der Oberflächengeometrie systematisch verzerrt wird und dieser Störeinfluss durch die Messung an der KSS-Strömungsoberfläche umgangen wird (Elsinga et al., 2005; Vanselow et al., 2020). Neueste Ergebnisse belegen eine Übertragbarkeit der Strömungsmessungen ohne Werkstück auf die Kühlleistung von konventionellen Schleifprozessen mit Werkstück (Meyer et al., 2022). Um das Strömungsverhalten aber vollständig beschreiben zu können, sind Strömungsmessungen nahe der Schleifscheibe und speziell in der Kontaktzone, also Messungen mit Werkstück erforderlich.

Die Messung der KSS-Strömung in Interaktion mit dem Werkzeug und dem Werkstück führt zu deutlich erhöhten Messanforderungen. Die räumlichen Dimensionen in der Kontaktzone liegen in der Größenordnung weniger Millimeter, wobei das für den Kühlprozess relevante Kühlmittel sich in den Zwischenräumen der rauen Schleifscheibe befindet (Meyer und Wagner, 2016). Um diese Strömung aufzulösen ist die Verwendung von Mikroskop-Objektiven notwendig, weswegen sich die hier präsentierten Untersuchungen zunächst auf die Strömung unmittelbar vor der Kontaktzone fokussieren. Ein weiterer Aspekt ist die Limitierung des verfügbaren Raums für das Fluid vor der Kontaktzone, was zu einer starken Tröpfchenbildung und damit potenziell zu einer Kontamination mit der Messsystemkomponente führt. Eine weitere Anforderung liegt darin, einen optischen Messzugang in die Kontaktzone zu schaffen, da das eingebrachte Werkstück das Sichtfeld auf die Schleifscheibenmantelfläche blockiert und damit eine Strömungsmessung in der Kontaktzone verhindert. Zur Untersuchung der KSS-Strömung in der Kontaktzone wird deshalb ein speziell gefertigtes optisches Werkstück verwendet, durch das eine Beleuchtung und Beobachtung der Strömung gewährleistet wird. Es soll nun untersucht werden, ob damit schleifscheiben- und werkstücknahe KSS-Strömungsmessungen möglich sind.

Lösungsansatz

Das Ziel ist eine Strömungsfeldmessung des KSS bei der Wechselwirkung mit einem Werkstück in einer realen Schleifmaschine. Dazu werden PIV-Messungen mit einer Beobachtung und Beleuchtung der Strömung im Kontaktbereich mithilfe eines transparenten Werkstücks umgesetzt. Um zufällige Messabweichungen zu reduzieren, wird der zeitliche Mittelwert der Strömung aus Mehrfachmessungen bestimmt.

Die Messanordnung zur Erfassung der Strömung in der Kontaktzone ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. Um die KSS-Strömung mit Werkstück-Werkzeug-Interaktion messen zu können, wird ein optischer Zugang für die Beleuchtung in der Kontaktregion mithilfe eines transparenten Werkstücks ermöglicht. In dem transparenten Werkstück ist ein Umlenkspiegel so montiert, sodass die Strömung aus dem Werkstück heraus mit Laserlicht beleuchtet und in einer 90°-Anordnung mit einer Kamera beobachtet werden kann. Das Werkstück wird so positioniert, dass sein Abstand zur Schleifscheibe minimal ist und die Schleifscheibe nicht berührt. Zur Visualisierung der Strömung wird die Lichtbrechung der Zwei-Phasen-Strömung genutzt, bei der das Laserlicht durch Lichtbrechung oder Totalreflexion am Phasenübergang von Strömungsstrukturen für die Kamera sichtbar wird. Es wird angenommen, dass zwischen den zwei Bildaufnahmen eine Selbständerung der Strömungsstrukturen klein im Vergleich zu deren räumlicher Bewegung ist, sodass aus den Doppelbildaufnahmen eine Bewegung der Strukturen mit der Strömungsgeschwindigkeit korreliert. Eine Berechnung

der Strömungsgeschwindigkeit basiert hierbei auf der PIV-typischen digitalen Kreuzkorrelation (digital image correlation, DIC).

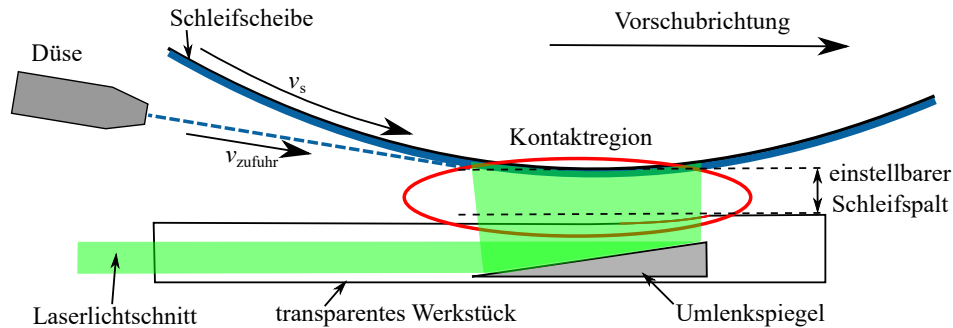


Abb. 1: Skizze vom Messprinzip der Strömungsmessung mit Wechselwirkung am Werkstück, welche durch die Verwendung eines transparenten Werkstücks ermöglicht wird. Die Beleuchtung zur Strömungsvisualisierung erfolgt über einen Umlenkspiegel innerhalb des transparenten Werkstücks. Beobachtet wird die Strömung senkrecht zur Vorschubrichtung des Schleifprozesses.

Versuchsaufbau und -durchführung

Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau für die KSS-Strömungsmessungen bei der Werkstück-Werkzeug-Wechselwirkung. Die KSS-Zufuhr erfolgt über eine Rouse-Düse mit einer Auslasshöhe von 1.25 mm und Auslassbreite von 20 mm, angepasst an die Breite der Schleifscheibe. Die verwendete Schleifscheibe hat einen Radius von 200 mm und rotiert mit einer Umfangsgeschwindigkeit von 35 m/s für Untersuchungen ohne Werkstück und 25 m/s für Untersuchungen mit Werkstück. Zur Beleuchtung wird ein gepulster Nd:YAG-Doppelpuls-Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm mit einer maximalen Energie pro Puls von 200 mJ und einer Pulslänge von 10 ns des Typs Evergreen der Firma Quantel verwendet. Um den Lichtschnitt in der Schleifmaschine realisieren zu können, wird ein Lichtführungsarm verwendet, der die notwendige Flexibilität und den Schutz der optischen Komponenten vor kontaminierendem Kühlmittel gewährleistet. Der Lichtführungsarm endet mit einer Lichtschnittoptik, die in einem wasserdichten Metallgehäuse untergebracht ist und über ein Auslassfenster den benötigten Lichtschnitt erzeugt. Für die Aufnahmen wird eine Andor Zyla 5.5 Mpx sCMOS-Kamera mit einem 100 mm makro-Objektiv verwendet. Messungen mit einem Abstand von 540 mm zur Messebene resultieren in Aufnahmen mit einer räumlichen Auflösung von 35 $\mu\text{m}/\text{px}$. Zur Reduzierung von Störeinflüssen während der Beobachtung der Wechselwirkung mit Werkzeug und Werkstück, ist in dem transparenten Werkstück eine Stufe mit einer Höhe von 40 mm eingefräst, die für einen glatten Abschluss der Zwei-Phasen-Strömung sorgt. Dies ist notwendig, da durch die Geometrie von Schleifscheibe und Werkstück der verfügbare Raum für den KSS limitiert wird und ein großer Anteil der Flüssigkeit seitlich zur Vorschubrichtung austritt. Da die Messung auf den Oberflächenstrukturen der Flüssigkeit basiert, würde dies zu verfälschten Ergebnissen führen.

Die experimentellen Untersuchungen finden in einer konventionellen Schleifmaschine für Volumenströme von 20 L/min und 30 L/min statt. Pro Strömungsfeld werden 1000 Messungen durchgeführt mit einer Aufnahmezeit von 15 Hz, wobei jede Messung eine Doppelaufnahme umfasst, deren zwei Bilder mit einem zeitlichen Abstand zwischen 10 μs bis 20 μs aufgenommen werden. Für Strömungsmessungen ohne die Wechselwirkung mit einem Werkstück, wird das Metallgehäuse mit der Lichtschnittoptik in einer Entfernung von etwa 30 cm unterhalb der Schleifscheibe positioniert. Für Messungen der Strömung mit dem Werkstück, wird über einen dielektrischen Umlenkspiegel, der innerhalb des Werkstückaufnehmers untergebracht ist, der Laserlichtschnitt durch das transparente Werkstück in den Schleifspalt umgelenkt.

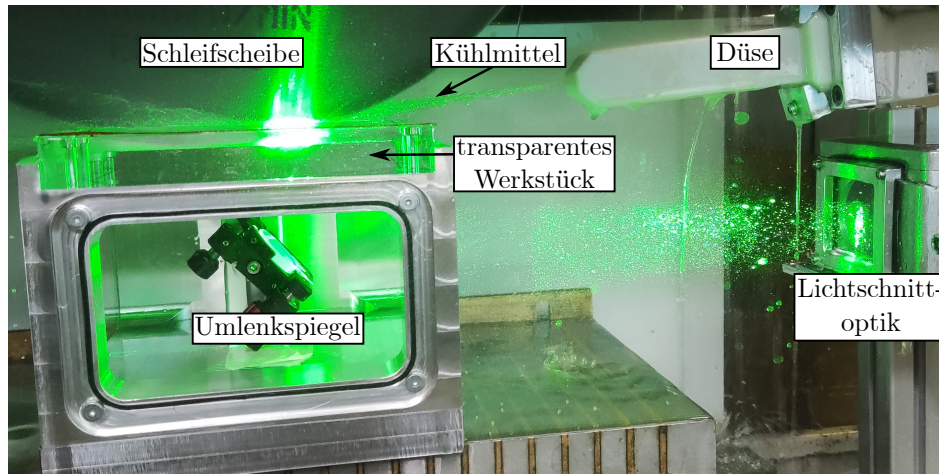


Abb. 2: Übersicht des Messsystems in der Schleifmaschine für den Fall der Strömungsmessung mit Werkstück. Für Messungen ohne Werkstück wird die Laserlichtschnittoptik an die Position des Werkstücks gestellt und der Laserlichtschnitt direkt auf die Schleifscheibe ausgerichtet.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden zunächst die Strömungsmessungen nur in Wechselwirkung mit der Schleifscheibe präsentiert und der Kühlprozess werkstückunabhängig charakterisiert. Anschließend werden die Strömungsmessungen in Wechselwirkung mit Werkzeug und Werkstück dargestellt und mit den Ergebnissen ohne Werkstück verglichen.

Ergebnisse ohne Werkstück

Hier wird der gesamte Strömungsprozess untersucht, der sich in die Bereiche Zufuhr (vor Wechselwirkung), Auftreffen (erste Wechselwirkung) und Mitnahme (weiterführende Wechselwirkung) unterteilen lässt. Aufgrund des limitierten Sichtfeldes von $65 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ werden die Messungen an zwei verschiedenen Positionen durchgeführt. Um das Strömungsverhalten während und nach der Wechselwirkung mit dem Werkzeug zu beobachten, ist die erste Position auf die erste Wechselwirkung der Zufuhrströmung mit der Schleifscheibe ausgerichtet und die zweite Position auf den tiefsten Punkt der Schleifscheibe (der als Ursprung $x = y = 0 \text{ mm}$ gesetzt wird). Die Positionen sind um 30 mm zueinander verschoben und die Sichtfelder überschneiden sich. In Abb. 3 sind die aufgenommenen und überlagerten Rohbilder der Strömungsvisualisierung beider Positionen für den Volumenstrom von 30 L/min exemplarisch dargestellt.

Die Strukturen der Strömungen werden von dem Laserlichtschnitt mit einer Pulsdauer von 10 ns beleuchtet und resultieren in *eingefrorenen* Momentaufnahmen der Strömungszustände. Im Gegensatz zur Beobachtung von Streulicht an kleinen Partikeln, wie es für PIV verwendet wird, wird hier das Laserlicht an den Strömungsstrukturen reflektiert, gebrochen oder gestreut. Auf diese Weise werden die Strömungsstrukturen in den Kamerabildern sichtbar. Somit basiert die Geschwindigkeitsberechnung auf den Strömungsstrukturen an der Oberfläche und nicht auf den Partikeln im Inneren der Flüssigkeit. Dadurch wird der ansonsten störende Einfluss der Lichtbrechung positiv genutzt und erlaubt eine Strömungsvisualisierung ohne die Verwendung von Seeding. Die Berechnung der Geschwindigkeitsfelder basiert auf der DIC-Auswertung der Doppelbildaufnahmen. Um eine möglichst hohe Auflösung im Bereich der Schleifscheibenwand zu gewährleisten, ist eine Auswertefenstergröße von $32 \text{ px} \times 8 \text{ px}$ gewählt worden mit einem Overlap von 75% , was zu einer Auflösung von $1.25 \text{ mm} \times 0.3 \text{ mm}$ führt. Folglich kann die Geschwindigkeit in einem Abstand von 0.3 mm zur Schleifscheibe berechnet werden.

In Abb.4 sind die resultierenden gemittelten 2d-Geschwindigkeitsfelder beider Perspektiven für einen Volumenstrom von 30 L/min dargestellt. Die Messungen der ersten Position reichen von $x = -67 \text{ mm}$ bis -3 mm

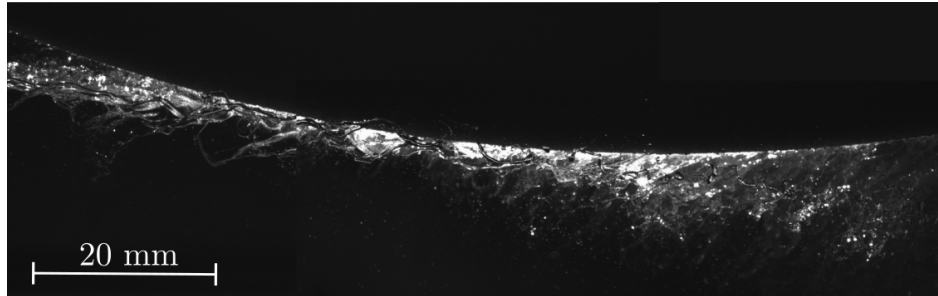
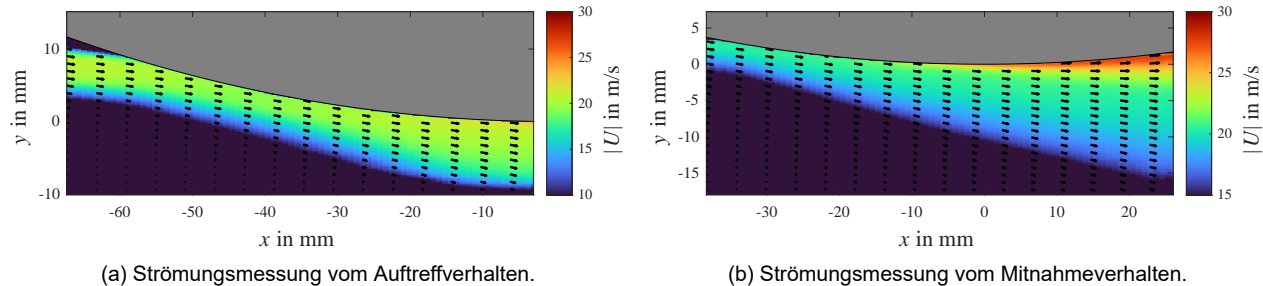


Abb. 3: Rohbildaufnahme der visualisierten Strömung ohne Werkstück. Die Strömungsstrukturen werden durch die Beleuchtung sichtbar und eignen sich für eine Geschwindigkeitsauswertung mit der DIC.



(a) Strömungsmessung vom Auftreffverhalten.

(b) Strömungsmessung vom Mitnahmeverhalten.

Abb. 4: Gemittelte Strömungsfelder der KSS-Strömung in Wechselwirkung der Schleifscheibe ohne Werkstück. Der Betrag der Geschwindigkeit wird farblich codiert angegeben und die Vektoren beschreiben die Richtungskomponente der Strömung.

und für die zweite Position von $x = -37$ mm bis 27 mm. Der Bereich der Zufuhr beinhaltet keine Wechselwirkung mit der Schleifscheibe und erstreckt sich hier von $x = -67$ mm bis -60 mm. Aus diesem Bereich kann die Geschwindigkeit und Richtung als entscheidende Größe für die KSS-Zufuhr bestimmt werden. Für die gewählte Düse und einem Volumenstrom von 30 L/min liegt eine Zufuhrgeschwindigkeit v_{Zufuhr} von 20.54 m/s vor, die in einem Winkel von 5° zur x-Achse auf einer Höhe von etwa 5 mm auf die Schleifscheibe kurz vor der Kontaktzone auftrifft. Eine solche Ausrichtung der Zufuhr wird als günstig bezeichnet (Meyer et al., 2022). Das Geschwindigkeitsverhältnis von Zufuhrgeschwindigkeit zu Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit von ~ 0.60 ist für einen optimal gekühlten Schleifprozess jedoch zu gering (Heinzel et al., 2020). Um die Zufuhrbedingungen aus strömungstechnischer Sicht zu bewerten, wird im Folgenden die erste und weiterführende Wechselwirkung, d.h. im Auftreff- und Mitnahmeverhalten beschrieben.

Der Auftreffbereich ist definiert als der Bereich, in dem die Flüssigkeit erstmals mit der Schleifscheibe in Wechselwirkung tritt. Es ist zu erwarten, dass die Geschwindigkeit beim Aufprall abnimmt und sich die Richtung des Fluids ändert, bis dieses anschließend mitgeführt wird. Der Bereich kann spezifiziert werden für $x = -55$ mm bis -35 mm. Eine Geschwindigkeitsabnahme bis zu 1 m/s wird gemessen, was im Verhältnis zur Zufuhrgeschwindigkeit gering ist. Der fließende Übergang von Auftreffbereich zu Mitnahmebereich bestätigt die Annahme der günstigen Zufuhrausrichtung.

Nach dem Auftreffbereich ist die Strömung in direktem Kontakt mit der Schleifscheibe und haftet teilweise an ihr. Durch die Anhaftung wird die Flüssigkeit entsprechend der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe beschleunigt, während ein Teil der Flüssigkeit die Haftung an der Oberfläche verliert. Unabhängig von den Volumenströmen zeigt sich ein signifikanter Geschwindigkeitsanstieg im Bereich $x > 0$ mm, der eine starke Scherströmung im Bereich $y > 0$ mm aufweist. Trotz der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe von 35 m/s wird nur eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 27.45 m/s gemessen; die Flüssigkeit wird also nicht auf die maximal mögliche Geschwindigkeit beschleunigt. Die gemessene Wechselwirkung der Flüssigkeit mit der Schleifscheibe zeigt, dass die Anhaftung der Flüssigkeit an der Schleifscheibe in erster Linie eine Frage des Transports des Kühlmittels ist, und nicht der Beschleunigung. Dies deutet darauf hin, dass

die Kühlleistung weniger vom Massenstrom, sondern vielmehr der Zufuhrgeschwindigkeit des Kühlmittels abhängig ist.

Ergebnisse mit Werkstück

Nachdem die Strömung für die reine Wechselwirkung mit dem Werkzeug beschrieben ist, wird die gemessene Strömung für die Werkzeug-Werkstück-Wechselwirkung diskutiert. Messungen wurden für Volumenströme von 20 L/min und 30 L/min durchgeführt bei einer Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit von 25 m/s. Die Messungen sind entsprechend des Aufbaus aus Abb.2 durchgeführt worden, wobei der Abstand zwischen Schleifscheibe und Werkstück so klein wie möglich, aber ohne direkten Kontakt zueinander eingestellt ist. Da der verfügbare Raum für die Flüssigkeit jetzt sowohl durch die Schleifscheibe als auch durch das Werkstück limitiert wird, würde ein signifikanter Anteil der Flüssigkeit senkrecht zur Vorschubrichtung in Richtung der Kamera auslaufen und die Messungen stören. Daher wurde eine 40 mm hohe Stufe in das Werkstück eingearbeitet, durch die die Strömung beobachtet wird. Analog zu Messungen ohne Werkstück wird die Messung an zwei Positionen durchgeführt und die Strömungsgeschwindigkeit mit der auf DIC basierenden Auswertung bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt. Der gesamte Messbereich umfasst

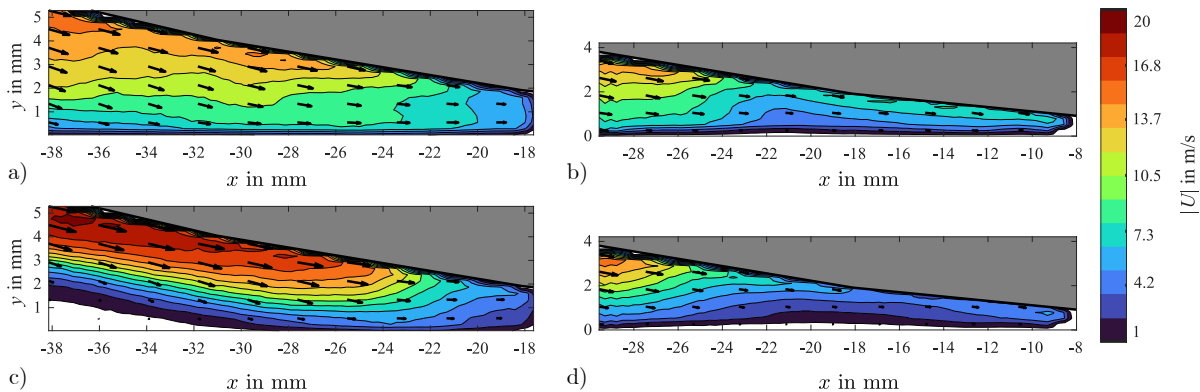


Abb. 5: Gemittelte Geschwindigkeitsfelder der Strömung für die Werkzeug-Werkstück-Wechselwirkung. Die Vektorpfeile zeigen die Richtung der Strömung an und der Betrag der Strömungsgeschwindigkeit ist als Kontur farblich codiert: a) und b) Volumenstrom 20 L/min; c) und d) Volumenstrom 30 L/min.

die Fläche von $x = -38$ mm bis -8 mm und $y = 0$ mm bis 5 mm, mit dem Tiefpunkt der Schleifscheibe als Ursprung. Eine Auswertung der Geschwindigkeit näher am Ursprung liefert keine plausiblen Ergebnisse, da die räumliche Auflösung nicht ausreichend war. Die Aufnahmen liegen alle im Bereich der Mitnahme, sodass die weiterführende Wechselwirkung der Flüssigkeit mit der Schleifscheibe bereits vorliegt. Für die beiden Volumenströme zeigt sich ein vergleichbares Strömungsverhalten bei der Werkzeug-Werkstück-Wechselwirkung: Im Bereich von $x = -38$ mm bis -30 mm liegt eine maximale Geschwindigkeit vor, die insbesondere nahe der Schleifscheibe hoch ist. Diese Strömung kann in erster Näherung als Strömung ohne Wechselwirkung mit dem Werkstück verstanden werden, da aufgrund der Anordnung und Geometrie der Raum zwischen Schleifscheibe und Werkstück hinreichend groß ist. Mit dem Voranschreiten der Strömung in Richtung des Tiefpunktes nimmt die Geschwindigkeit jedoch drastisch ab. Ab $x = -22$ mm ist ein Umschlagpunkt zu erkennen, ab dem sich die Strömung signifikant anders verhält. Die Strömung verlangsamt sich für beide Volumenströme deutlich und tritt ab einem Wandabstand zwischen Schleifscheibe und Werkstück von ca. 2.5 mm verstärkt in Wechselwirkung mit dem ruhenden Werkstück. Erwähnenswert ist, dass für den geringeren Volumenstrom von 20 L/min eine Geschwindigkeit von etwa 6 m/s gemessen wird, wohingegen die Messung für den Volumenstrom von 30 L/min eine leicht geringere Geschwindigkeit von etwa 4 m/s in Werkstücknähe ergibt. Dies zeigt auf, dass die zusätzliche Wechselwirkung mit dem Werkstück einen gegenläufigen Effekt in Form einer Geschwindigkeitsabnahme bei einer Erhöhung der KSS-Versorgung erzeugen kann, der auch als Überversorgung bezeichnet wird (Heinzel et al., 2015). Dadurch, dass der Raum für das Fluid im Kontaktzonenzulauf limitiert ist, sammelt sich ein Teil der Flüssigkeit unmittelbar vor der Kontakt-

zone an, die nahezu keine Geschwindigkeit mehr aufweist. Wie sich dies auf den Kühlprozess auswirkt, ist noch zu untersuchen.

Für die weiteren Untersuchungen der KSS-Strömung in die Kontaktzone muss berücksichtigt werden, dass der für den Kühlprozess entscheidende Anteil des Fluids mit der gewählten Perspektive nicht beobachtet werden kann, da dieser sich in den nur etwa 5 µm bis 50 µm großen Lücken der rauen Oberfläche der Schleifscheibe befindet. Die hier dargestellten Ergebnisse verfügen zunächst über eine Auflösung bis 300 µm, die eine Messung des kühlrelevanten Fluids noch nicht ermöglicht. Dennoch zeigen die bisher erreichten Messungen bereits auf, dass der Effekt einer Überversorgung plausibel ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Messergebnisse der KSS-Strömung in Wechselwirkung mit der rotierenden Schleifscheibe und dem Werkstück vorgestellt, die eine fluiddynamische Kausalität auf den durch erzwungene Konvektion bedingten Kühlprozess beim Schleifen aufzeigen. Die Strömungsmessungen des Kühlprozesses ohne Werkstück ermöglichen eine detaillierte Definition von Zufuhr-, Auftreff- und Mitnahmebereich und erste Erkenntnisse zum Kühlprozess. Für die aus der Literatur als vorteilhaft benannten Anströmparameter zeigte sich in den Strömungsmessungen im Auftreffbereich eine geringe Abnahme der Zufuhrgeschwindigkeit von 1 m/s, als auch eine gute Mitnahme auf der Schleifscheibe. Ferner konnte gezeigt werden, dass die Mitnahme der Flüssigkeit zwar zu einer Beschleunigung der Strömung führt, die Anhaftung der Flüssigkeit an der Schleifscheibe jedoch nicht ausreicht, um die Strömung auf die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit zu beschleunigen. Ein großer Teil des KSS verbleibt aufgrund der hohen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit nicht auf der Schleifscheibe, dem insbesondere mit der Wahl des Auftreffpunktes der KSS-Zufuhr entgegengewirkt werden kann. Dies deutet darauf hin, dass die Kühlleistung weniger vom Massenstrom, sondern vielmehr der Zufuhrgeschwindigkeit des Kühlmittels abhängig ist.

Die Korrelation der aufgenommenen Bilder ermöglicht eine Auflösung der Strömung in 300 µm Abstand zur Schleifscheibenwand. Bei Untersuchungen ohne Werkstück erlaubt dies eine hinreichende Beschreibung der Strömung, jedoch wird für eine detaillierte Beschreibung der Strömung, die effektiv in den Schleifspalt mitgenommen wird, eine Erhöhung der Auflösung im Bereich der Wandnähe um mindestens den Faktor 10 benötigt. Dennoch liefert der Messansatz schon jetzt einen Mehrwert für ein grundlegendes Verständnis der fluid- und thermodynamischen Wechselwirkung des Kühlprozesses beim Schleifen.

Die vorgestellte Strömungsmessung nahe der Kontaktzone erlaubt erstmals eine fluiddynamische Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen KSS, Werkzeug und Werkstück. Das Strömungsfeld zeigt ein Anstauverhalten des KSS unmittelbar vor der Kontaktzone. Dieses Strömungsverhalten kann die Ursache für eine reduzierte Kühlleistung bei einer Überversorgung von KSS sein. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass mit dem präsentierten Messansatz noch nicht die für den Kühlprozess relevante Strömung im Schleifspalt gemessen wird. Dies ist Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten.

Dankesworte

Diese Arbeit wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) mit der Fördernummer 415003387.

Literatur

Brinksmeier, E., Meyer, D., Huesmann-Cordes, A. G., Herrmann, C., 2015: "Metalworking fluids—Mechanisms and performance", CIRP Annals, Vol. 64, No. 2 pp. 605–628, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2015.05.003

Elsinga, G. E., van Oudheusden, B. W., Scarano, F., 2005: "Evaluation of aero-optical distortion effects in PIV", Experiments in Fluids, Vol. 39, No. 2 pp. 246–256, ISSN 0723-4864, doi:10.1007/s00348-005-1002-8

Espenhahn, B., Schumski, L., Vanselow, C., Stöbener, D., Meyer, D., Fischer, A., 2021: "Feasibility of Optical Flow

Field Measurements of the Coolant in a Grinding Machine”, Applied Sciences, Vol. 11, No. 24 p. 11615, ISSN 2076-3417, doi:10.3390/app112411615

Guo, C., Malkin, S., 1994: “Analytical and Experimental Investigation of Burnout in Creep-Feed Grinding”, CIRP Annals, Vol. 43, No. 1 pp. 283–286, ISSN 00078506, doi:10.1016/S0007-8506(07)62214-8

Heinzel, C., Kirsch, B., Meyer, D., Webster, J., 2020: “Interactions of grinding tool and supplied fluid”, CIRP Annals, Vol. 69, No. 2 pp. 624–645, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2020.05.001

Heinzel, C., Kolkwitz, B., 2019: “The Impact of fluid supply on energy efficiency and process performance in grinding”, CIRP Annals, Vol. 68, No. 1 pp. 337–340, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2019.03.023

Heinzel, C., Meyer, D., Kolkwitz, B., Eckebrecht, J., 2015: “Advanced approach for a demand-oriented fluid supply in grinding”, CIRP Annals, Vol. 64, No. 1 pp. 333–336, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2015.04.009

Meyer, D., Schumski, L., Guba, N., Espenhahn, B., Hüsemann, T., 2022: “Relevance of the region of interaction between the tool and the metalworking fluid for the cooling effect in grinding”, CIRP Annals, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2022.04.055

Meyer, D., Wagner, A., 2016: “Influence of metalworking fluid additives on the thermal conditions in grinding”, CIRP Annals, Vol. 65, No. 1 pp. 313–316, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2016.04.016

Morgan, M. N., Jackson, A. R., Wu, H., Baines-Jones, V., Batako, A., Rowe, W. B., 2008: “Optimisation of fluid application in grinding”, CIRP Annals, Vol. 57, No. 1 pp. 363–366, ISSN 00078506, doi:10.1016/j.cirp.2008.03.090

Rouly, E., Bauer, R. J., Warkentin, A., 2017: “An investigation into the effect of nozzle shape and jet pressure in profile creepfeed grinding”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 231, No. 7 pp. 1116–1130, ISSN 0954-4054, doi:10.1177/0954405415584960

Schumski, L., Guba, N., Espenhahn, B., Stöbener, D., Fischer, A., Meyer, D., 2022: “Characterization of the Interaction of Metalworking Fluids with Grinding Wheels”, Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol. 6, No. 3 p. 51, ISSN 2504-4494, doi:10.3390/jmmp6030051

Vanselow, C., Espenhahn, B., Schumski, L., Stöbener, D., Meyer, D., Fischer, A., 2021: “Strömungsfeldmessung der Kühlschmierstoffzufuhr an der Schleifscheibe”, tm - Technisches Messen, Vol. 88, No. 12 pp. 785–794, ISSN 2196-7113, doi:10.1515/teme-2021-0098

Vanselow, C., Stöbener, D., Kiefer, J., Fischer, A., 2020: “Revealing the impact of laser-induced breakdown on a gas flow”, Measurement Science and Technology, Vol. 31, No. 2 p. 027001, ISSN 0957-0233, doi:10.1088/1361-6501/ab471e